



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
LETECKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

KONCENTRÁTORY NAPĚTÍ V LETECKÝCH KONSTRUKCÍCH

STRESS CONCENTRATORS IN AIRCRAFT STRUCTURES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JIŘÍ ČERNOTA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. PETR AUGUSTIN, Ph.D.

BRNO 2014

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá významnými koncentrátory napětí na skládaných leteckých konstrukcích vyrobených z kovových materiálů. Vytváří přehled nejvýznamnějších vrubů a jejich vlivu na únavovou životnost. Dále uvádí možnosti popisu koncentrace napětí a konstrukční řešení vedoucí k jejímu snížení.

Abstract

This bachelor's thesis deals with significant stress concentrators in composed plane constructions made of metal materials. It generates summary of the most significant notches and their effect on fatigue life. It further states opportunities of description of constructional solution leading to reduction of stress concentration.

Klíčová slova

Koncentrátor, napětí, vrub, únava, konstrukce.

Keywords

Concentrator, stress, notch, fatigue, construction.

Citace

Jiří Černota: Koncentrátory napětí
v leteckých konstrukcích, bakalářská práce, Brno, FSI VUT v Brně, 2014

Koncentrátory napětí v leteckých konstrukcích

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a pod vedením pana Ing. Petra Augustina, Ph.D.

.....
Jiří Černota
30. května 2014

Poděkování

Rád bych poděkoval všem, kteří mi ochotně pomohli při tvorbě této práce, zvláště pak vedoucím práce panu Ing. Petru Augustinovi Ph.D. za jeho neocenitelné rady a významnou pomoc při hledání zdrojů informací.

© Jiří Černota, 2014.

Tato práce vznikla jako školní dílo na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě strojního inženýrství. Práce je chráněna autorským zákonem a její užití bez udělení oprávnění autorem je nezákonné, s výjimkou zákonem definovaných případů.

Obsah

1	ÚVOD	2
2	NAPJATOST V OKOLÍ VRUBŮ	3
2.1	SOUČINITEL KONCENTRACE NAPĚTÍ	4
2.2	VLIV KONCENTRACE NAPĚTÍ NA ÚNAVOVOU PEVNOST	5
3	PRVKY KONSTRUKCE LETOUNU PŮSOBÍCI JAKO KONCENTRÁTORY NAPĚTÍ	11
3.1	SPOJE	14
3.1.1	KONCENTRACE NAPĚTÍ NA NEZATÍŽENÉM OTVORU	14
3.1.2	ROZLOŽENÍ ZATÍŽENÍ MEZI SPOJOVACÍ PRVKY	15
3.1.3	KONCENTRACE NAPĚTÍ NA ZATÍŽENÉM OTVORU PRO SPO- JOVACÍ PRVEK	19
3.2	ODLEHČOVACÍ A TECHNOLOGICKÉ OTVORY	22
3.2.1	OTVORY VE STOJINÁCH NOSNÍKŮ	23
4	ZÁVĚR	26
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	27
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	28

Kapitola 1

ÚVOD

Snaha udržet váhu letecké konstrukce na co nejnížší úrovni vyplývá z funkce, pro kterou je navrhována. Se zvyšující se hmotností rostou dynamické síly, působící na konstrukci, zhoršují se některé letové vlastnosti, roste počet omezení v pevnosti povrchu k přistávání a vzletům a podobně. Snižování váhy tak vede konstruktéry k minimalizaci hmoty v konstrukci letounu. Důsledkem toho se letouny navrhují s nižší hodnotou koeficientu bezpečnosti, než je ve strojírenství obvyklé, což si v kombinaci s cyklickým namáháním vyžaduje pečlivý a detailní rozbor každé části konstrukce. Protože je nemožné se vyhnout konstrukčním vrubům, je jejich studie neodmyslitelnou součástí konstruování letecké techniky.

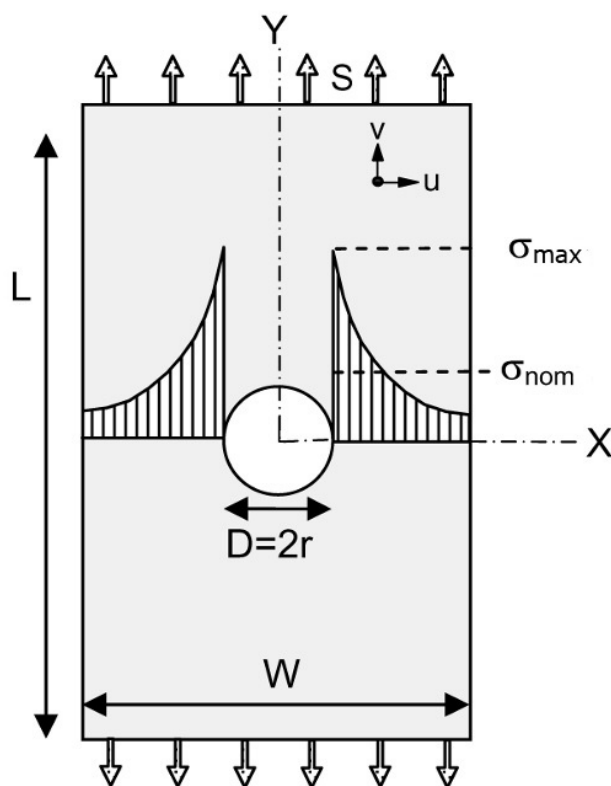
V první části svojí práce popisují obecnou teorii koncentrace napětí, vlivy způsobující její vznik a pojmy, které se toho týkají. V druhé části se věnují konkrétním koncentrátorům napětí na leteckých konstrukcích. Jsou zde uvedeny nejčastější konstrukční vruby, možnosti jejich vyhodnocování a některá doporučení ke snížení jejich vlivu na životnost konstrukce.

Kapitola 2

NAPJATOST V OKOLÍ VRUBŮ

Představme si jednoduché těleso zatížené normálovou silou a uvažujme napětí v průřezu dostatečně daleko od působišť sil. Nevyskytuje-li se poblíž žádná geometrická nepravidelnost, pak je napětí rozděleno rovnoměrně.

Jiná situace nastává, sledujeme-li průběh napětí v okolí geometrických nepravidelností, jakými jsou všechny tvarové a průřezové změny v konstrukci, které souhrnně nazýváme vruby. Bez ohledu na to, jestli je vrub účelnou technologickou částí tělesa, nebo materiálovou vadou, vytváří ve svém okolí podmínky pro lokální zvýšení nominálních napětí. Výsledkem je nerovnoměrný průběh napětí podél průřezu, jehož maximum σ_{max} často několikanásobně překračuje napětí vztahované k průřezu v místě vrubu tzv. nominální napětí σ_{nom} . Tento jev je obecně označován jako koncentrace napětí [7, 8].



Obrázek 2.1: Rozložení koncentrace napětí okolo vrubu [8]

Pojem vrub lze zobecnit například tímto rozdělením:

- **konstrukční vruby** - jako jsou různé formy spojů a geometrických vrubů (zápichy, drážky, osazení, příčné otvory, závitů atd.)
- **technologické vruby** - charakterizované mikrorelíefem povrchu od opracování, přechody mezi různými povrchy materiálu po chemicko-tepelném či mechanickém zpracování, stopami po manipulaci s výrobkem apod.
- **metalurgické vruby** - vzniklé v důsledku nehomogenity materiálu při jeho zpracování do požadovaného tvaru tj. výrazné poruchy vnitřní struktury, vměstky aj. [7]

2.1 SOUČINITEL KONCENTRACE NAPĚTÍ

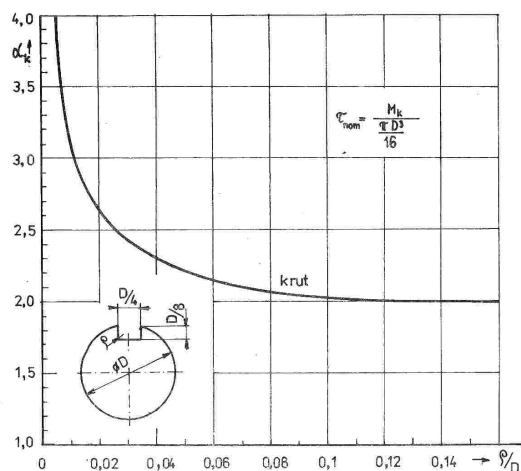
Na obrázku 1.1 je rovnoměrně zatížená součást s otvorem, jenž představuje vrub. V kritickém místě nejmenšího průřezu způsobuje otvor nerovnoměrné rozložení napětí charakterizované maximálním napětím σ_{max} v kořeni vrubu a nominálním napětím σ_{nom} vztaženým na oslabený průřez bez vlivu koncentrace napětí. Poměr mezi maximálním a nominálním napětím, za předpokladu elastických deformací, definuje součinitel koncentrace napětí α (v anglosaské literatuře k_t) [8].

$$\alpha = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}} [-] \quad (2.1)$$

Ze vztahu 2.1 je zřejmé, že ze známé hodnoty nominálního napětí, vztaženého na nejmenší průřez v místě vrubu, zjistíme maximální hodnotu napětí v kořeni vrubu jako:

$$\sigma_{max} = \sigma_{nom} * \alpha \quad (2.2)$$

Velikost součinitele koncentrace napětí závisí na způsobu namáhání, geometrii tělesa a vrubu. Jeho analytické vyčíslení je možné jen v omezených případech. Hodnoty se dříve zjišťovaly nejčastěji experimentálně (optickými metodami, tenzometrickým měřením apod.) a byly tabelovány nebo zanášeny do grafů pro snadnější odečítání. S nástupem výpočetní techniky byly tyto metody z větší části nahrazeny numerickými metodami, např. výpočtem pomocí metody konečných prvků (MKP).



Obrázek 2.2: Graf k určení součinitele koncentrace napětí pro hřídel s drážkou [7]

V případech, kdy je součást s vrubem namáhána kombinovaným zatížením, pracujeme s tzv. redukovaným součinitelem koncentrace napětí:

$$\alpha_{red} = \frac{\sigma_{(max)red}}{\sigma_{nom}} = \alpha * \nu [-] \quad (2.3)$$

kde

$$\nu = \frac{\sigma_{red}}{\sigma_1} [-] \quad (2.4)$$

Hodnota bezrozměrné veličiny ν tedy závisí na velikosti hlavního napětí σ_1 a pevnostní hypotéze použité ke stanovení redukovaného napětí σ_{red} [9].

Při porovnání účinků dvou různých koncentrátorů napětí má kromě součinitele α svůj význam i gradient napětí v kořeni vrubu G :

$$G = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{d\sigma}{dx} \quad (2.5)$$

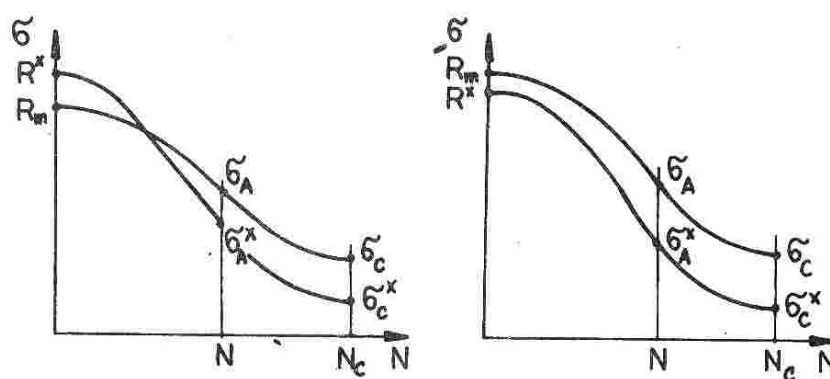
kde x je vzdálenost od kořene vrubu, respektive poměrný gradient napětí γ :

$$\gamma = \frac{G}{\sigma_{max}} [mm^{-1}] \quad (2.6)$$

Geometricky jde o směrnici tečny k průběhu napětí v kořeni vrubu a lze pomocí něj vymežit tzv. exponovaný objem součásti, tj. objem součásti, v němž napětí přesahují danou mez [7].

2.2 VLIV KONCENTRACE NAPĚTÍ NA ÚNAVOVOU PEVNOST

V případě cyklického zatěžování vede lokální zvýšení napětí v okolí vrubu ke snížení únavové pevnosti součásti. U houževnatých materiálů může dojít ke zvýšení meze pevnosti, v důsledku lokálního zpevnění v kořeni vrubu, mez únavy se ale sníží několikanásobně. Obvykle vrub zvětšuje sklon šikmé větve Wöhlerovy křivky. [7].



Obrázek 2.3: Wöhlerovy křivky součásti s vrubem a bez vrubu [7]

Obrázek 2.3 ukazuje vliv vrubu na Wöhlerovy křivky součásti z houževnatých (vlevo) a křehkých materiálů (vpravo). Charakteristické body s horním indexem x náleží součásti

opatřené vrubem. Poměr mezi únavy hladké σ_c a vrubované součásti σ_c^x definuje "součinitel vrubu" β :

$$\beta = \frac{\sigma_c}{\sigma_c^x} [-] \quad (2.7)$$

Hodnota součinitele vrubu bývá poněkud nižší, než hodnota součinitele tvaru. Vysvětlení tohoto rozdílu se nejprve hledalo na základě představy o tzv. vrubové citlivosti q , jakožto materiálové konstantě. Součinitel vrubu se pak ze známého součinitele koncentrace napětí α stanovuje následovně:

$$\beta = 1 + q * (\alpha - 1) \quad (2.8)$$

Teorie součinitele vrubové citlivosti jako materiálové konstanty pochází od Thuma (1934), je však čistě empirická a pozdější rozborů zkoušek ukázaly, že o konstantu nejde. Zjistilo se, že při rostoucích rozměrech součásti, čili zvětšujícím se poloměru zaoblení ρ v kořeni vrubu, se q blíží k jedné. Z toho vyplynulo, že tato veličina závisí na gradientu napětí ve vrubu [7, 8, 9].

Vznikla celá řada rovnic pro výpočet součinitele β jako funkce součinitele α , poloměru zaoblení vrubu a gradientu napětí. V následující tabulce jsou uvedeny některé z nich.

Autor	Vztah	Poznámka	číslo rovnice
Neuber	$\beta = 1 + \frac{\alpha-1}{1+\sqrt{A/\rho}}$	A - viz. obrázek 2.4	(2.9)
Peterson	$\beta = 1 + \frac{\alpha-1}{1+a/\rho}$	Oceli: a=0,06..0,25 Al-Cu a=0,20 Al-Zn-Mg a=0,07	(2.10)
Heywood	$\beta = \frac{\alpha}{1+2\frac{a-1}{a}\sqrt{a/\rho}}$		(2.11)
Siebel-Stiller	$\beta = \frac{a}{1+\sqrt{c\gamma}}$		(2.12)
Eichelseder	$\beta = \frac{a}{1+(\frac{\sigma_{co}}{\sigma_{cn}-1})(\frac{G}{2/d})^{K_d}}$	Kde σ_{co} a σ_{cn} jsou meze únavy v ohybu a v tahu. d je průměr ohýbaného vzorku a K_d je 0,3 pro ocel a 0,59 pro hliníkové slitiny	(2.13)
Němec	$\beta = [1 + (a\frac{\vartheta}{\vartheta_\beta} - 1)\eta]\psi$		(2.14)

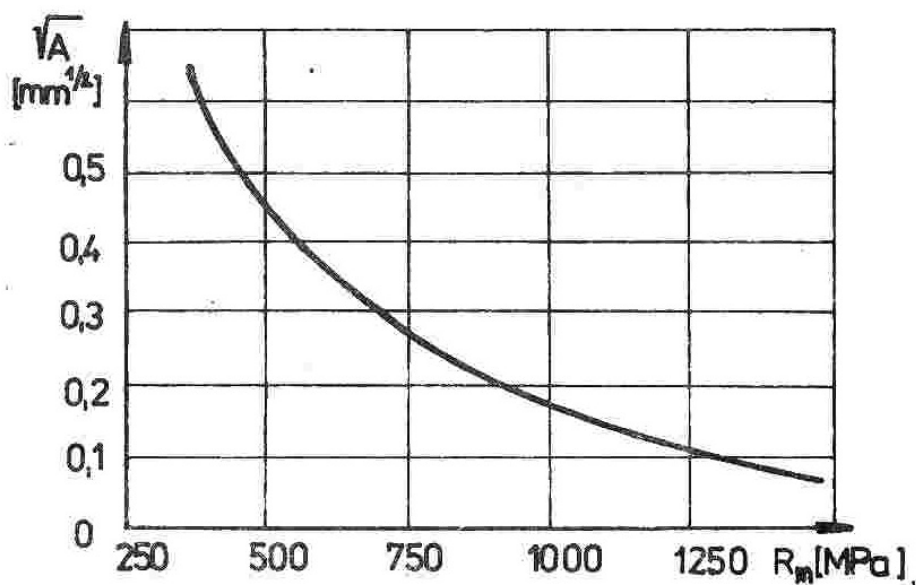
Tabulka 2.1: Rovnice pro výpočet součinitele β [7, 4]

Neuberova rovnice 2.9 uplatňuje nejmenší poloměr vrubu ztotožněným s rozměrem zrna materiálu. Konstanta A je závislá na statické pevnosti materiálu (viz. Obr. 2.4).

K podobnému vztahu došel Peterson 2.10, zde a je materiálová konstanta a vyjadřuje hloubku povrchové vrstvy, kde se ještě uplatní špičky napětí na únavu [9].

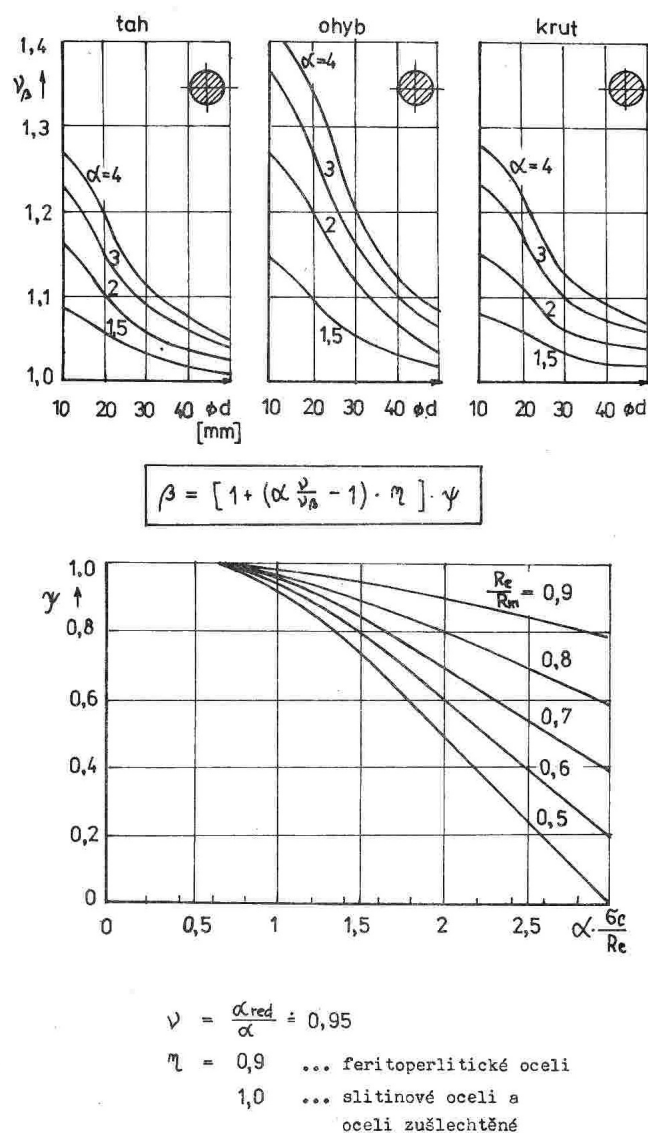
Heywoodův analyticko-empirický vztah 2.11 zahrnuje v konstantě a vliv gradientu napětí a diagram pro její zjištění lze najít např. v [7].

Stejně jako pro 2.11, i pro 2.12 lze najít diagramy pro zjištění součinitele β jako funkci poměrného gradientu napětí γ v [7].



Obrázek 2.4: Neuberova konstanta [7]

Ve vztahu 14 figurují součinitele vyjadřující velikost součásti, zpevnění materiálu, stav napjatosti a citlivost materiálu η . Jejich volba je zřejmá z diagramu 2.5 [7].



Obrázek 2.5: Diagramy pro stanovení součinitele vrubu podle Němce [7]

V oblasti časované pevnosti je součinitel vrubu závislý na počtu cyklů, pro které je určován. Analogicky k 2.7 se zavádí zobecněný součinitel vrubu:

$$\beta_N = \frac{\sigma_A}{\sigma_A^x} [-] \quad (2.15)$$

Přítomnost vrubu ovlivňuje průběh únavového procesu: mění se poměr i délka jednotlivých stádií procesu i děje v nich probíhající. Součinitel β se obvykle snižuje se snižujícím počtem cyklů, proto se v případech, kdy není dostatek podkladů k popisu této závislosti, uvažuje součinitel vrubu konstantní. Existují však empirické aproximace pro určení součinitele vrubu v oblasti časované pevnosti Wöhlerovy křivky. Např. Heywoodova aproximace pro vysokocyklovou oblast: [7].

$$\beta_N = 1 + (\beta - 1) * \frac{\log^2 N}{b + \log^4 N} \quad (2.16)$$

Kde b je konstanta závislá na materiálu. Například pro oceli bylo odvozeno:

$$b = \left(\frac{12050}{Rm[MPa]} \right)^2 \quad (2.17)$$

Pomocí vztahu 2.16 lze odvodit fiktivní únavovou křivku kritického místa reálné součásti. Hovoříme potom o syntetických únavových křivkách. [6].

Příklad při vytvoření rodiny syntetických Wöhlerových křivek je v literatuře [6]. Zde bylo využito vztahu 2.12, 2.15 a 2.16 ve tvaru:

$$\beta = \frac{a}{1 + \sqrt{c * \gamma}} \quad (2.18)$$

kde:

$$c = (10^{-K_1})^2 \quad (2.19)$$

$$\beta_N = 1 + (\beta - 1) * \frac{\log^E N}{b + \log^E N} \quad (2.20)$$

a kde:

$$b = \left(\frac{1}{(1 + \gamma)^{K_3} * \frac{K_4}{Rm[MPa]}} \right)^2 \quad (2.21)$$

a

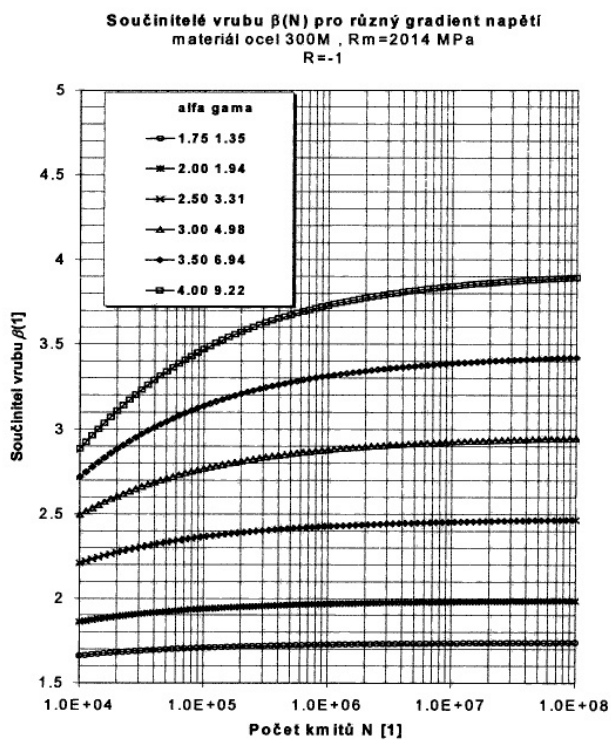
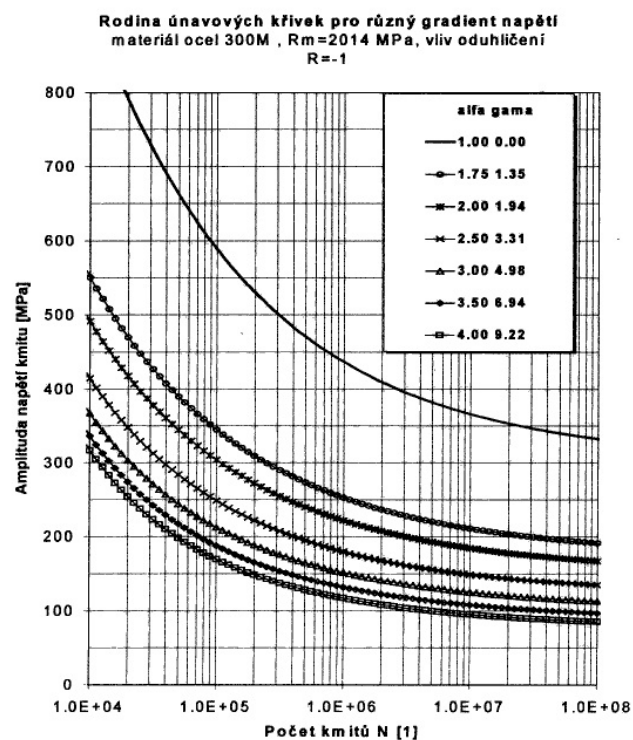
$$E = 4 * \gamma^{K_2} \quad (2.22)$$

Ve kterých bylo metodou nelineární regrese vypočtené parametry, udané v tabulce 2.2

Prametr	Materiál ASTM 300M
K1	2,41
K2	0,1
K3	-0,98
K4	6000

Tabulka 2.2: Konstanty pro vykreslení únavových křivek [6]

Vynesené Wöhlerovy křivky a součinitele vrubu jsou pak na obrázku 2.6.



Obrázek 2.6: Součinitel vrubu a odvozené syntetické Wöhlerovy křivky [6]

Kapitola 3

PRVKY KONSTRUKCE LETOUNU PŮSOBÍCI JAKO KONCENTRÁTORŮ NAPĚTÍ

Koncentrace napětí je jeden z hlavních faktorů ovlivňujících únavovou životnost konstrukce letounu. Je proto důležité se při navrhování letounu detailně věnovat typickým místům způsobujícím koncentraci napětí jako jsou např.:

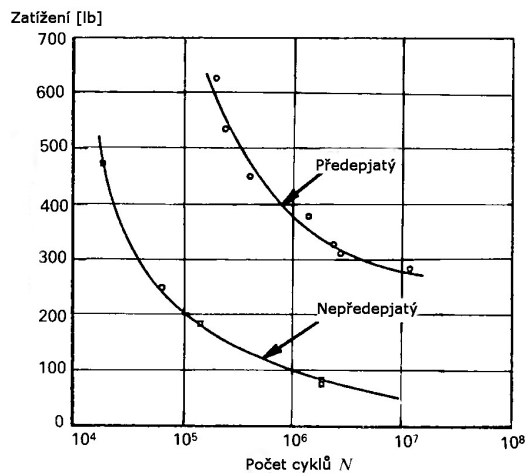
- spoje
- místa vykazující excentricitu
- náhlé změny průřezu
- vruby
- ostré hrany

[2]

V [1] autor uvádí následující doporučení pro minimalizování vlivu koncentrátorů napětí na únavový život konstrukce:

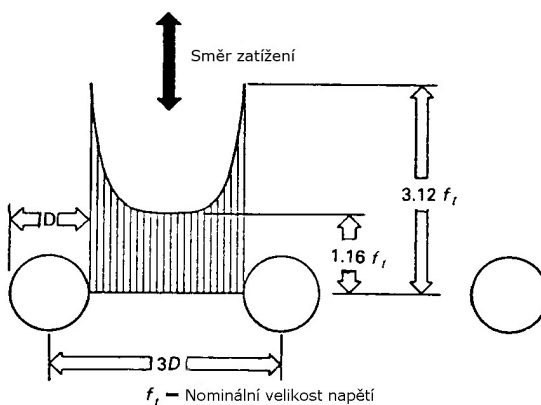
- preferovat symetrické spoje vždy, když je to možné
- spoje navrhovat tak, aby zatížení bylo rozloženo rovnoměrně na jejich jednotlivé části
- u obráběných dílů zajistit odpovídající navýšení tloušťky spojovaných prvků v místě nýtovaných a šroubových spojů
- dodržovat minimální okrajovou vzdálenost rovnou dvojnásobku průměru spojovacího prvku
- vyhnout se jednořadým spojům, navrhovat dvě a více řad spojovacích prvků pokud je to možné
- dávat přednost dvoustřížným spojům
- v případě potřeby používat distanční podložky ke snížení lokálního zatížení vyhnout se s náhlým změnám průřezů

- vyvarovat se superpozici koncentrace napětí v okolí více vrubů (zachovat dostatečné vzdálenosti mezi vruby)
- používat spoje s předpětím (obrázek 3.1)



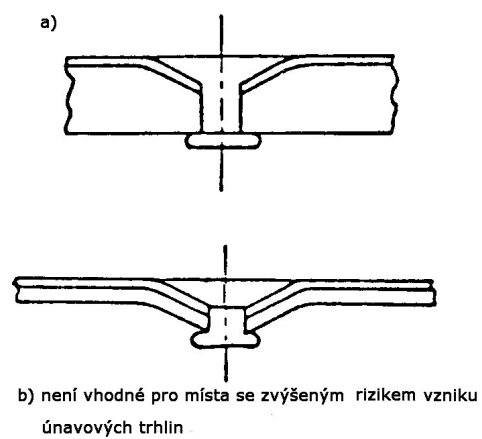
Obrázek 3.1: Vliv předpětí na únavový život spoje [1]

- otvory pro spoje rozmisťovat ve vzdálenostech 4 - 8 násobku průměru (obrázek 3.2)

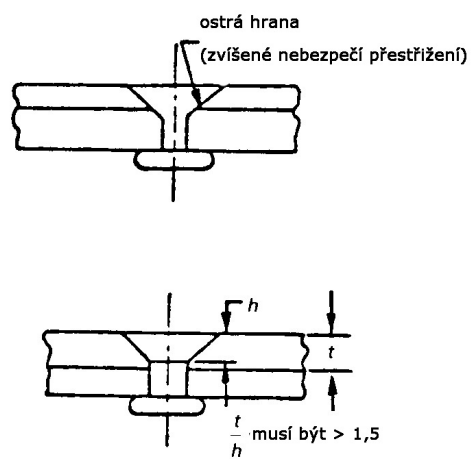


Obrázek 3.2: Průběh napětí mezi dvěma otvory [1]

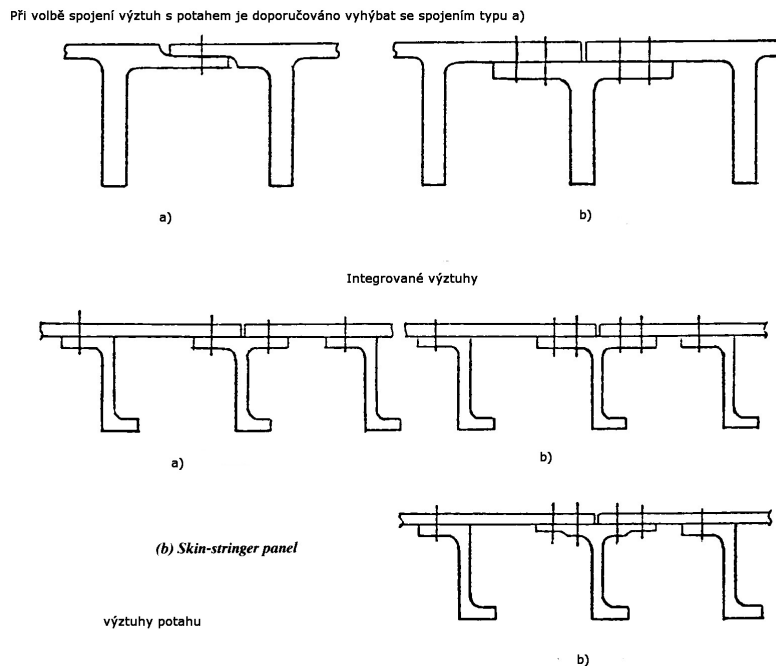
- obráběné a protlačované zahlubování provádět podle obrázku 3.3 a 3.4
- nepoužívat protlačované zahloubení v místech namáhaných ohybem
- podélné spoje křídla by měly být řešeny podle vzoru b) na obrázku 3.5



Obrázek 3.3: Protlačované zahlubování [1]



Obrázek 3.4: Obráběné zahlubování [1]



Obrázek 3.5: Spojování potahu s výztuhami [1]

3.1 SPOJE

Spoje na kovových leteckých konstrukcích jsou nejčastěji realizovány nýtováním. Jde o nerozebíratelné spojení tenkostěnných, zejména deskových konstrukcí. V letectví se s úspěchem používá ke spojení duralového potahu s kosterou konstrukce, nebo vytvoření profilů nýtovaných žeber a nosníků. Proces nýtování probíhá ve třech krocích svrtání spojovaných součástí, vložení nýtu a vytvoření závěrné hlavy roznýtováním dřívku. Roznýtování se dosahuje rozmanitými způsoby podle typu spojení, přístupnosti nýtovaného místa, případně nároků na spojení. V místech, kde je znemožněn přístup z jedné strany, se používají nýty s vytrhovacím trnem, v některých případech nýty s výbušninou v závěrné hlavě. Mezi výhody nýtování patří zvládnutá technologie (což do jisté míry umožňuje automatizovat tento proces), dále pak jednoduchost a ekonomičnost. Značnou nevýhodou je umělé vytvoření velkého množství vrubů[3].

V místech, kde se z provozních důvodů požaduje demontáž, nebo u spojů s většími přenášenými silami, se používá rozebíratelného šroubového spojení. Spojení zajišťuje šroub s maticí, případně je jedna ze součástí opatřena vlastním závitem. [3].

3.1.1 KONCENTRACE NAPĚTÍ NA NEZATÍŽENÉM OTVORU

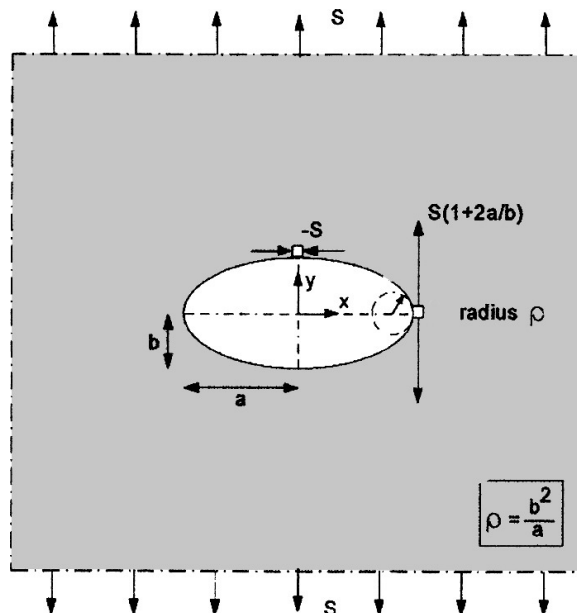
Pro každý nýtový, nebo šroubový spoj je nutné vytvořit průchozí otvor v materiálu, tedy vytvořit v něm vrub. Samotný otvor bývá kruhového tvaru, v kritických místech (například první řada nýtů) vystružen, nebo plasticky zvětšený pro lepší únavové vlastnosti. Rozložení napětí okolo otvoru v taženém pásu je na obrázku 3.1. Byly odvozeny numerické aproximace pro stanovení součinitele koncentrace napětí, ale exaktní analytické vyjádření pro tento zdánlivě jednoduchý případ není k dispozici. Nicméně pro případ eliptického otvoru v desce s nekonečnými rozměry byl odvozen analytický vztah 3.1

$$\alpha = 1 + 2 * \frac{a}{b} \quad (3.1)$$

nebo

$$\alpha = 1 + 2 * \sqrt{\frac{a}{\rho}} \quad (3.2)$$

kde a je délka hlavní, b délka vedlejší poloosy a ρ poloměr zaoblení ve vrcholu elipsy na poloose a . Jednoduchou úpravou lze ukázat, že v případě $a = b$ je α rovna třem [8].



Obrázek 3.6: Eliptický otvor v desce nekonečných rozměrů [8]

V případech, kdy se otvory nachází poblíž okraje nýtované součásti, je nutné využití diagramů součinitele tvaru zohledňujících geometrické aspekty polohy otvoru.

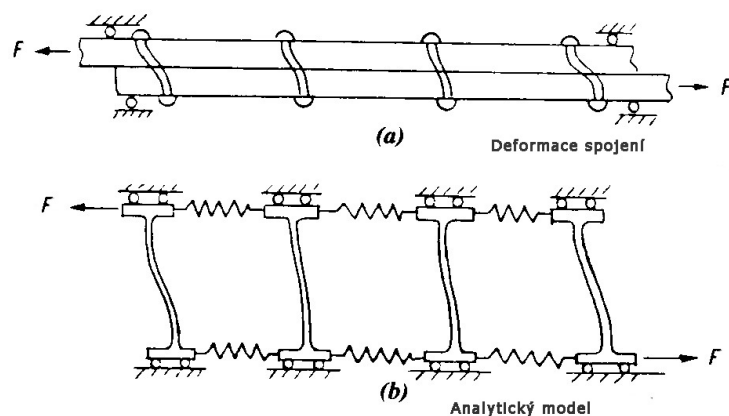
3.1.2 ROZLOŽENÍ ZATÍŽENÍ MEZI SPOJOVACÍ PRVKY

Pokud je spojení dvou a více součástí realizováno pouze jednou řadou nýtů pak síla, kterou zatěžujeme obě součásti, bude přibližně rovnoměrně rozložena mezi jednotlivé nýty. Výsledná síla působící na jeden nýt z řady bude:

$$F_i = \frac{F}{n} [N] \quad (3.3)$$

kde F_i je síla přenášená nýtem, n je počet nýtů v řadě a F je síla působící na spojení (v kolmém směru).

Pokud je ale řad spojovacích prvků více, pak je působící síla přenášena po částech každou z řad. Mezi jednotlivými řadami tak vzniká napětí od dosud nepřenesené části síly [1].



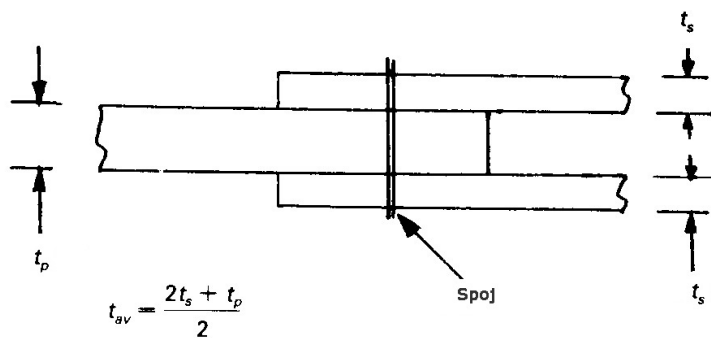
Obrázek 3.7: Model přeplátovaného spoje se čtyřmi spojovacími prvky [1]

V souladu s obr. 3.7 (b) lze navrhnout zjednodušený model spoje založený na základě tuhostních charakteristik jednotlivých spojovacích prvků. V [1] jsou uvedeny empirické vztahy pro stanovení poddajnosti spojovacích prvků, na jejichž základě můžeme pomocí grafů (3.9 - 3.11) odhadnout zatížení přenášené jednotlivými spojovacími členy. Jejich přehled je uveden v tabulce 3.1.2. V rovnicích 3.4 - 3.10 figurují následující proměnné:

E [Pa] - modul pružnosti materiálu spojovacích elementů t_{av} [m] - střední tloušťka spojovaných materiálů (viz obrázek 3.8)

A	B	C	Tuhostní konstanty spojovacího prvku [inch/lb]	číslo rovnice
ocel	ocel	ocel	$\frac{8}{t_{av}E} \{0, 13(\frac{t_{av}}{d})^2 [2, 12 + (\frac{t_{av}}{d})^2] + 1, 0\}$	(3.4)
Al-slitina	Al-slitina	Al-slitina	$\frac{8}{t_{av}E} \{0, 13(\frac{t_{av}}{d})^2 [2, 12 + (\frac{t_{av}}{d})^2] + 1, 0\}$	(3.5)
Al-slitina	Al-slitinal	ocel	$\frac{8}{t_{av}E} \{0, 13(\frac{t_{av}}{d})^2 [2, 12 + (\frac{t_{av}}{d})^2] + 1, 87\}$	(3.6)
Al-slitina	ocel	ocel	$\frac{8}{t_{av}E} \{0, 13(\frac{t_{av}}{d})^2 [2, 12 + (\frac{t_{av}}{d})^2] + 1, 43\}$	(3.7)
Al-slitina	ocel	Al-slitina	$\frac{8}{t_{av}E} \{0, 13(\frac{t_{av}}{d})^2 [2, 12 + (\frac{t_{av}}{d})^2] + 0, 84\}$	(3.8)
Al-slitina	Al-slitina	titan	$\frac{8}{t_{av}E} \{0, 133(\frac{t_{av}}{d})^2 [2, 06 + (\frac{t_{av}}{d})^2] + 1, 242\}$	(3.9)
Al-slitina	titan	titan	$\frac{8}{t_{av}E} \{0, 132(\frac{t_{av}}{d})^2 [2, 06 + (\frac{t_{av}}{d})^2] + 1, 1125\}$	(3.10)

Tabulka 3.1: Tuhostní konstanty spoje pro některé kombinace materiálů [1]



Obrázek 3.8: dvojstržný spoj [1]

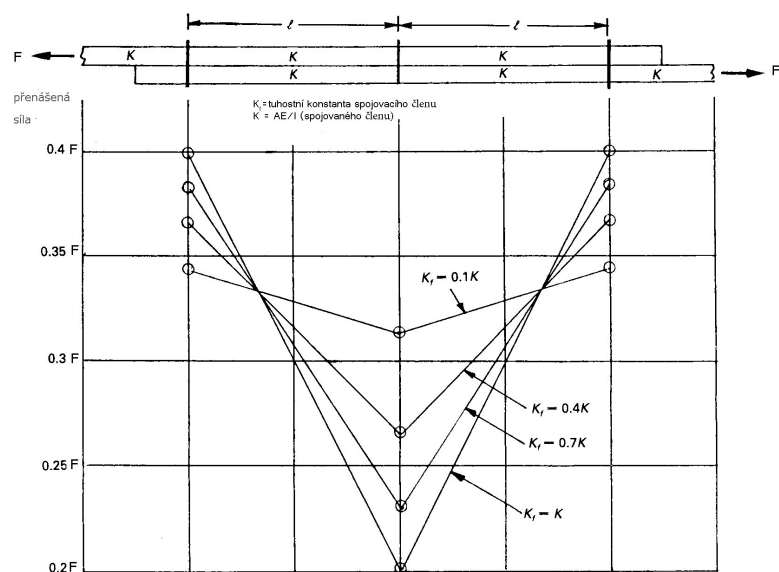
Tuhostní konstanta $K_f[N/m]$ je potom rovna převrácené hodnotě poddajnosti C spojovacího prvku, čili:

$$K_f = \frac{1}{C}[N/m] \quad (3.11)$$

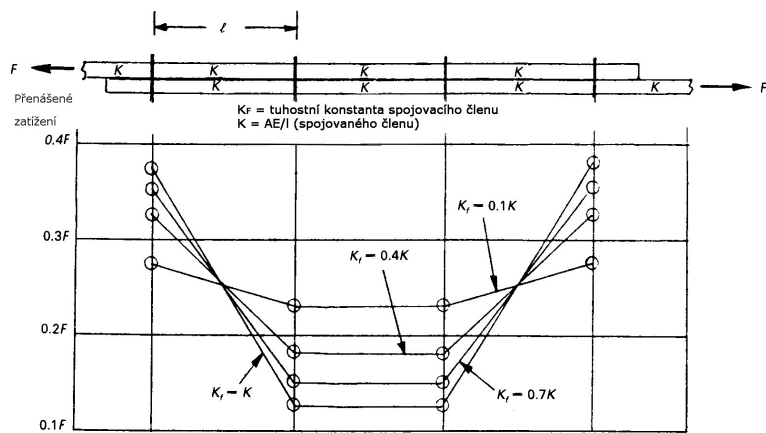
a tuhost spojovaných materiálů:

$$K = \frac{A * E}{l}[N/m] \quad (3.12)$$

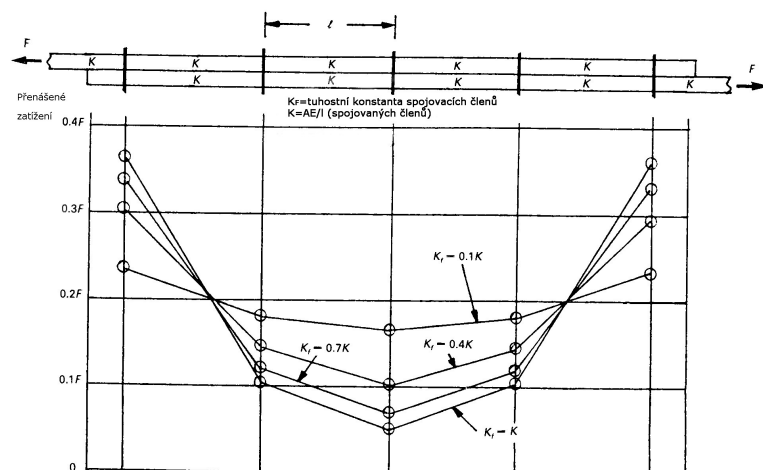
kde E [Pa] je modul pružnosti materiálu, l [m] je vzdálenost mezi spojovacími prvky a A průřez spojovaného prvku.



Obrázek 3.9: rozložení zatížení mezi tři spoje [1]



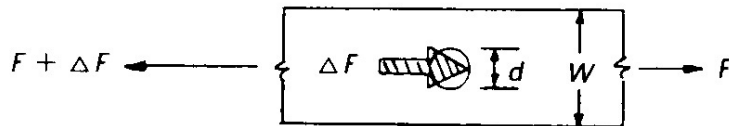
Obrázek 3.10: rozložení zatížení mezi čtyři spoje [1]



Obrázek 3.11: rozložení zatížení mezi pět spojů [1]

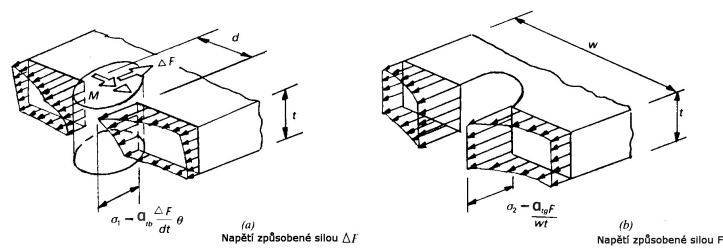
3.1.3 KONCENTRACE NAPĚTÍ NA ZATÍŽENÉM OTVORU PRO SPOJOVACÍ PRVEK

Místo otvoru pro spojovací prvek je zatíženo silou, kterou na otvor působí spojovací prvek (ΔF) a částí síly působící na spojované součásti, která bude přenesena následujícími řadami spojovacích elementů (F) (bypass load), jak je znázorněno na obrázku 3.12. Velikost těchto napětí lze stanovit právě výpočtem naznačeným v předchozím textu.



Obrázek 3.12: uvolnění části zatížené pásnice s nýtem

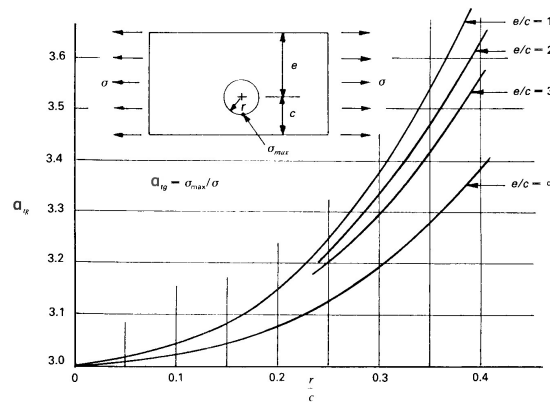
Maximum napětí od sil F a ΔF lze v místě otvoru odhadnout pomocí příslušných součinitelů koncentrace. V případě napětí od síly ΔF je nutné počítat nejen s gradientem napětí v rovině kolmé na osu otvoru, ale i s nárůstem ve směru osy. Tento nárůst vyjadřuje součinitel θ (bearing distribution factor), jehož velikost nalezneme v grafu 3.16. Další součinitele koncentrace pak v grafech 3.14 a 3.15. Rozložení napětí v okolí otvoru pro spojovací prvek je na obrázku 3.13 Jsou zde znázorněny dvě maxima (napětí způsobené silou ΔF a napětí od síly F), které se navzájem skládají. Výsledné napětí je tady dáno vztahem 3.13[2].



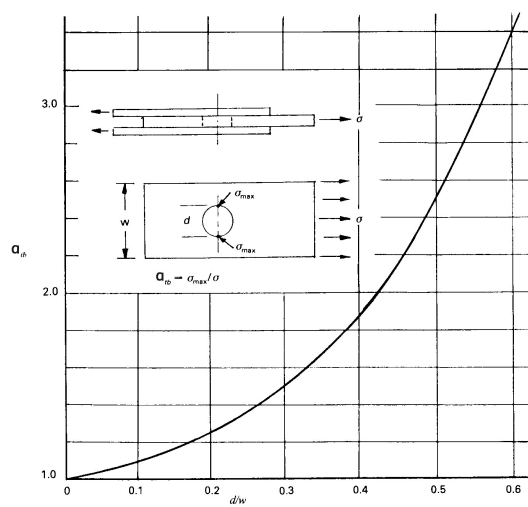
Obrázek 3.13: napětí způsobené silami [1] ΔF a F

$$\sigma_{max} = \sigma_1 + \sigma_2 = \alpha_{tb} * \frac{\Delta F}{t * d} * \theta + \alpha_{tg} * \frac{F}{w * t} \quad (3.13)$$

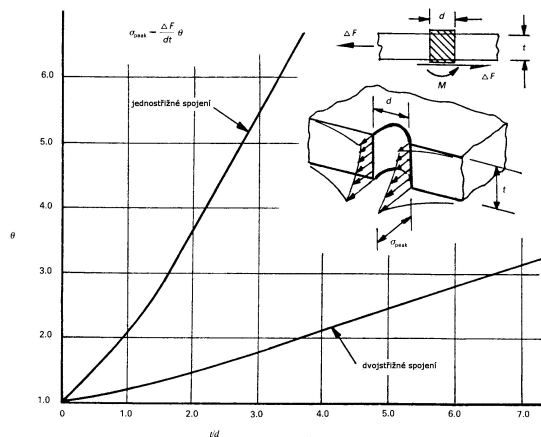
kde α_{tb} je součinitel koncentrace napětí způsobené silou ΔF , α_{tg} koeficient koncentrace napětí způsobené silou F , θ součinitel rozložení, t je tloušťka spojované součásti, w je šířka spojované součásti a d je průměr otvoru.



Obrázek 3.14: koncentrace napětí způsobené silou ΔF [1]

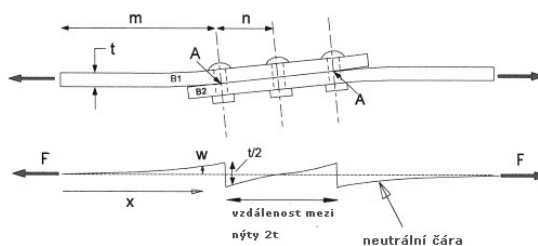


Obrázek 3.15: koncentrace napětí způsobené silou F [1]



Obrázek 3.16: součinitel rozložení napětí [1]

Frekventovaným typem spoje v leteckých konstrukcích je jednotřížné překlátované spojení. Toto spojení je namáháno excentricky (viz obrázek 3.17), což způsobuje výrazný nárůst koncentrace napětí vlivem vyvolaného sekundárního ohybového momentu [8].

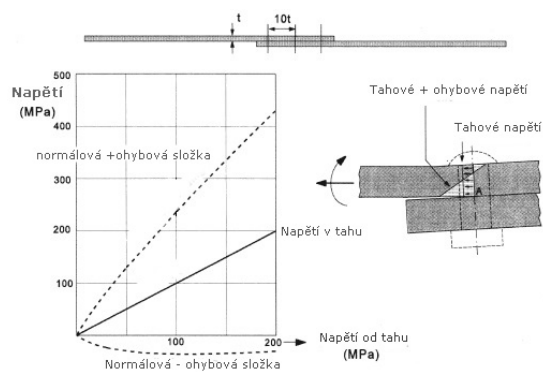


Obrázek 3.17: Deformace a vznik ohybového momentu v jednotřížném spojení [8]

Poměr nominálního napětí od ohybového momentu a normálového napětí je vyjádřen ohybovým faktorem k .

$$k = \frac{\sigma_O}{\sigma_N} \quad (3.14)$$

Výsledné napětí je na ohybovém napětí závislé nelineárně, což vystihuje graf na obrázku 3.18. vypočítaný pro jednotřížné spojení se třemi řadami spojovacích prvků. Ohybový faktor je zde 1,36 při normálovém napětí 100 MPa, což je značně menší než ohybový koeficient 3 pro spojení s jednou řadou nýtů. Obecně platí, že s rostoucí vzdáleností jednotlivých řad od sebe snižuje ohybový faktor a zlepšují se únavové vlastnosti spojení [8].



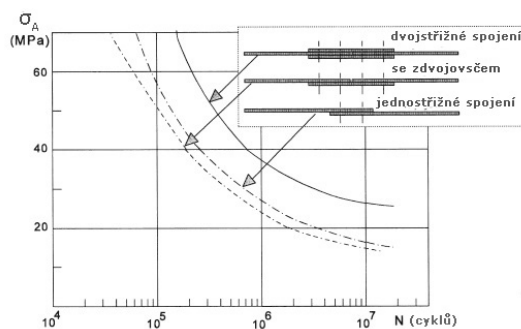
Obrázek 3.18: Průběh napětí u jednostřížného spojení v závislosti na silovém zatížení [8]

Koncentrace napětí jednostřížných spojení lze určit pomocí vztahu 3.15, jenž navrhly Homan a Jongebreur. Je do něj zahrnut vliv ohybového momentu, zatížení přenášené spoji (F) a zatížení jednotlivých spojů (ΔF) [8].

$$\alpha_t = \gamma * \alpha_{tb} + (1 - \gamma) * \alpha_{tg} + k * \alpha_{oh} \quad (3.15)$$

kde γ procentuální část zatížení přenášené danou řadou, k je ohybový faktor, α_{oh} je součinitel koncentrace napětí způsobeného ohybovým momentem a α_{tb} a α_{tg} mají stejný význam jako v 3.13.

Na obrázku 3.19 jsou vykreslené Wöhlerovy křivky pro 3 různé typy spojení. Nízkou hodnotu amplitudy napětí při porušení lze vysvětlit superpozicí koncentrací napětí způsobených ohybovým momentem u jednostřížných spojení a korozí třením vznikající v místech spojovacích členů [8].



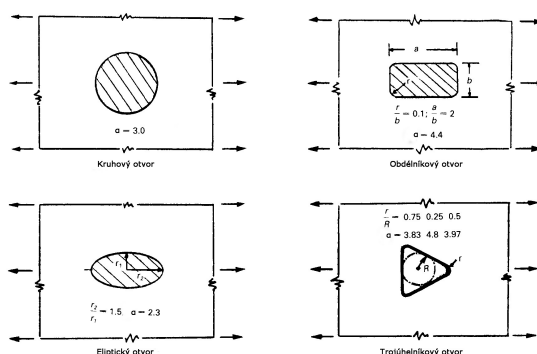
Obrázek 3.19: Wöhlerovy křivky pro tři způsoby spojení [8]

3.2 ODLEHČOVACÍ A TECHNOLOGICKÉ OTVORY

Požadavky na přístupnost při prohlídkách a opravách letadlových konstrukcí, stejně jako nutnost rozvádět systémy napříč letounem nutí konstruktéry vytvářet technologické otvory v konstrukci letounu. Jedná se o otvory v potahu letounu, které jsou nutné k prohlídkám jinak nepřístupných míst, otvory ve stojinách nosníků pro vedení elektrických kabelů nebo hydraulických, pneumatických a dalších systémů i odlehčovací otvory ke snížení hmotnosti konstrukce. Koncentrace napětí na takovýchto otvorech je funkcí jejich tvaru, který se liší

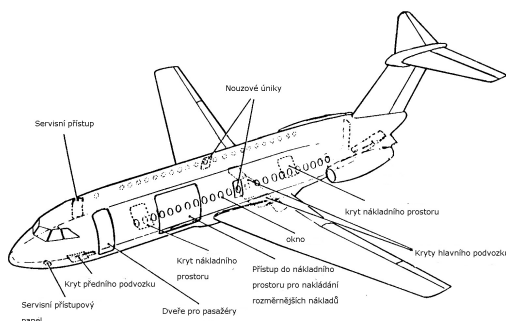
podle účelu otvoru (některé obvyklé tvary s odpovídajícím součinitelem koncentrace napětí pro desku nekonečných rozměrů jsou uvedeny na obrázku 3.20)[1].

Pokud jsou otvory relativně malé vzhledem k velikosti součásti, ve které se nacházejí, pak má jejich efekt lokální charakter. Naproti tomu velké otvory ovlivňují celkovou pevnost sekcí, ve kterých se nacházejí. V každém případě je lokální zvýšení napětí potenciální hrozbou z pohledu únavového poškození konstrukce [1].



Obrázek 3.20: Koncentrace napětí různých tvarů otvorů [1]

Drak transportních a nákladních letounů je opatřen mimo technologické a odlehčovací otvory ještě funkčními otvory jako jsou dveře pro pasažéra, nákladní dveře, okna a podobně. Bývají často umístěné v místech, které musí přenést velké zatížení. Proto je nutné navrhnout takový otvor tak, aby jeho blízké okolí dokázalo tuto sílu přenést [1].



Obrázek 3.21: Funkční otvory na komerčním letounu [1]

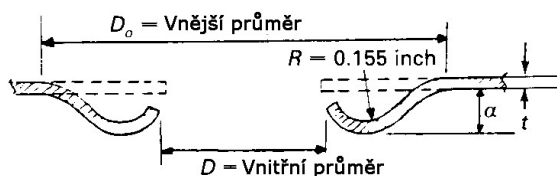
3.2.1 OTVORY VE STOJINÁCH NOSNÍKŮ

Stojiny nosníků jsou za letu namáhány převážně smykem. Jejich tloušťka je navrhována podle velikosti působících smykových sil [5].

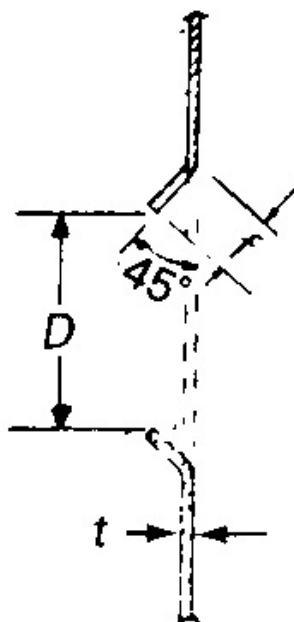
V některých případech je výhodné, nebo dokonce nezbytné vytvořit ve stojině nosníku otvor. Jedná se o otvory pro snížení hmotnosti, technologické a přístupové otvory. Pro zvýšení odolnosti proti zvlnění se otvory vystužují obdobně jako na obrázcích 3.22, 3.23. Typ otvoru musí být volen s přihlédnutím na velikost a proměnlivost smykových napětí. Při nevhodném návrhu vznikají vlivem koncentrace napětí v místech velkých proměnlivých smykových toků únavové trhliny [1, 2, 5].

Absence analytického modelu a neuspokojivé množství experimentálních dat dělá z navrhování otvorů ve stojinách nosníků poměrně složitý úkol [2].

V případech, kdy je nosník zatížen jen málo proměnlivými silami, se používají otvory vystužené prosazenými hranami (obrázek 3.23), případně s ohnutým rádiusem jak je zobrazeno na obrázku 3.22 [2].

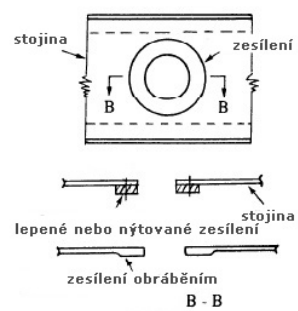


Obrázek 3.22: Ohnuté okraje otvoru [1]



Obrázek 3.23: Osazené okraje otvoru [1]

Při výrobě prosazení nebo ohnutí hran otvorů mohou vlivem vnitřního pnutí a tvrdnutí materiálů vzniknout trhlinky. Z hlediska únavové životnosti je proto výhodnější vystužovat otvory rámečkem, nebo zesílením okraje otvoru (obrázek 3.24). Nejběžpečnější řešení z hlediska vzniku únavových trhlin je hladký otvor bez vyztužení, který zároveň vykazuje největší zeslabení stojiny. Při navrhování otvorů ve stojinách se tak volí optimální řešení mezi statickou a únavovou pevností [5].



Obrázek 3.24: Otvor ve stojině vystužený rámečkem, nebo zesílením okraje [2]

Kapitola 4

ZÁVĚR

Při tvorbě této práce byla koncentrace napětí uvažována jako schopnost jinak drobných detailů letecké konstrukce několikanásobně snížit její životnost. Byly uvedeny některé matematické modely určené k předpovědi vlivu koncentrace napětí na chování materiálu při cyklickém zatěžování. Vzhledem ke složitosti únavových procesů jsou uvedené vzorce jen výjimečně analytické a většinou se jedná o empiricky určené vztahy, jejichž platnost je často omezená materiálem a podmínkami při kterých byly stanovené.

Přestože je shromažďování dat k analýze vlivu vrubů na životnost konstrukce časově a finančně velmi náročné, je nutné se mu aktivně věnovat. Některé historické momenty dokládají skutečnost, že zanedbání koncentrace napětí na letounu může vést k tragickým situacím.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] CHUN-YUNG, M. N.: *Airframe Structural Design - Practical design information and data on aircraft structures*. Hong Kong: conmlit press LTD, 1995, ISBN 962-7128-08-2.
- [2] CHUN-YUNG, M. N.: *Aircraft Structures - Airframe Stress Analysis And Sizing*. Hong Kong: conmlit press LTD, 1999, ISBN 962-7128-08-2.
- [3] DRAXLER, K.; JIRÁČEK, V.; KULČÁK, L.; aj.: *Aerodynamika, konstrukce a systémy letounů*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005, ISBN 80-7204-367-6.
- [4] EICHLSEDER, W.; LEITNER, H.: Influence of Stress Gradient on S/N-Curve. Technická zpráva, Institute of Mechanical Engineering, University of Leoben, Austria, 2002.
- [5] KAHÁNEK, V.: Stojiny nosníků křídel a ocasních ploch. Technická zpráva, Výzkumný a zkušební letecký ústav, 1986.
- [6] RŮŽIČKA, M.; FIDRANSKÝ, J.: *Pevnost a životnost letadel*. Praha: České vysoké učení technické, 2000, ISBN 80-01-02254-4.
- [7] RŮŽIČKA, M.; HANKE, M.; ROST, M.: *Dynamická pevnost a životnost letadel*. Praha: České vysoké učení technické, 1989, ISBN 80-01-00886-X.
- [8] SCHIJVE, J.: *Fatigue of Structures and Materials*. Delft: Delft University of Technology, 2009, ISBN 978-1-4020-6807-2.
- [9] VLK, M.: *Dynamická pevnost a životnost*. Brno: VUT Brno, 1992, ISBN 80-214-0427-2.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

σ	.....	napětí
σ_{max}	.....	maximální napětí
σ_{nom}	.....	nominální napětí
σ_{red}	.....	redukované napětí
$\sigma_{(max)red}$	.....	maximální redukované napětí
σ_c	.....	mez únavy
σ_c^x	.....	mez únavy vzorku s vrubem
σ_A	.....	Amplituda napětí
σ_O	.....	napětí od ohybu
σ_N	.....	normálové napětí
σ_1	.....	maximální napětí způsobené silou ΔF
σ_2	.....	maximální napětí způsobené silou F
α	.....	Součinitel koncentrace napětí
α_{red}	.....	redukovaný Součinitel koncentrace napětí
α_{tg}	.....	součinitel koncentrace napětí
α_{tb}	.....	součinitel koncentrace napětí
K_t	.....	součinitel koncentrace napětí (anglosaské označení)
γ	.....	poměrný gradient napětí
G	.....	gradient napětí
N	.....	počet cyklů
R_m	.....	mez pevnosti
β	.....	součinitel vrubu
β_N	.....	zobecněný součinitel vrubu
F	.....	síla
ΔF	.....	bypass
E	.....	modul pružnosti v tahu
ρ	.....	rádius v kořeni vrubu
q	.....	součinitel vrubové citlivosti
K_f	.....	tuhostní konstanta
C	.....	poddajnost
θ	.....	součinitel rozložení
k	.....	ohybový faktor